

Effects of Biochar on the Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Leaching in Yellow Soil

Xian Huang, Xingwei Zhang, Zhenhong Wang*

College of Life Sciences, Guizhou University, Guiyang Guizhou
Email: *w_zhenhong@126.com, 965390760@qq.com

Received: Dec. 5th, 2017; accepted: Dec. 19th, 2017; published: Dec. 26th, 2017

Abstract

Yellow soil is the main soil type supporting agricultural production in Guizhou Province. Special Karst geological conditions and abundant rainfall in Guizhou Province cause soil nutrients intense leaching, and water pollution. Biochar can be used to improve soil environments and to control nutrient leaching. However, effects of biochar on nitrogen and phosphorus nutrients and leaching in yellow soil remain unclear. We used soil columns containing 0 kg/m² (B0), 2 kg/m² (B2), 4 kg/m² (B4) and 6 kg/m² (B6) biochar to simulate the nitrogen and phosphorus leaching at laboratory and tested total nitrogen, total phosphorus, NO₃⁻-N and NH₄⁺-N in leachate and soil nutrient contents in soils. The results showed that soil pH, total nitrogen, total phosphorus, available nitrogen and available phosphorus increased with the increasing of biochar addition. The addition of biochar resulted in the reduction of loss of water. Under the application of 2 kg/m², 4 kg/m², 6 kg/m² biochar to soils, the leachate volume decreased by 0.3%, 1.5% and 2.0% than those without adding biochar to soils, respectively. Under the same fertilization conditions, the addition of biochar significantly reduced TP, TN, NO₃⁻-N and NH₄⁺-N in leachate from soil columns than those without addition. The addition of 2 kg/m² biochar to soils was optimum. In general, applying biochar into yellow soil can improve soils and effectively reduce the loss of soil nutrients, and there is the most suitable biochar additions to achieve the TP, TN, NO₃⁻-N, NH₄⁺-N leaching control.

Keywords

Biochar, Yellow Soil, Soil Nutrients, Nitrogen and Phosphorus

生物炭对黄壤养分含量及氮磷淋失的影响

黄 娟, 张兴伟, 王震洪*

*通讯作者。

贵州大学生命科学学院, 贵州 贵阳
Email: *w_zhenhong@126.com, 965390760@qq.com

收稿日期: 2017年12月5日; 录用日期: 2017年12月19日; 发布日期: 2017年12月26日

摘要

黄壤是贵州省农业生产主要土壤类型, 特殊的土地条件与丰富的降雨造成土壤养分淋失, 而且会引起水体污染。生物炭可以用来改善土壤环境和控制养分的淋失。然而, 生物炭对黄壤中氮磷养分淋失的影响仍不是很清楚。本文采用室内土柱模拟淋溶方法, 设置添加0 kg/m² (B0)、2 kg/m² (B2)、4 kg/m² (B4)、6 kg/m² (B6) 4个水平生物炭, 研究4个处理对土壤养分含量及淋溶液体积、总氮、总磷、NO₃⁻-N和NH₄⁺-N淋失的影响。结果表明: 土壤添加生物炭后, 土壤pH、全氮、全磷、速效氮和速效磷含量随着生物炭添加量的增大而增加; 添加生物炭的处理减少了水分的流失, 添加2 kg/m²、4 kg/m²、6 kg/m²三个水平生物炭处理的累计淋溶液体积分别比未添加处理减少了0.3%、1.5%、2.0%; 同等施肥条件下, 添加生物炭处理与未添加相比, 均显著降低了土壤淋溶液里TP、TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N的累积淋失量, 但以2 kg/m²处理降低效果最好。综上, 黄壤中添加生物炭能够改善土壤和有效减少土壤养分的流失, 其中有一个最适宜的生物炭添加量实现TP、TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N淋失控制达到良好效果。

关键词

生物炭, 黄壤, 土壤养分, 氮磷淋失

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

氮磷是植物正常生长发育必需的营养元素, 对植物生长或生理代谢有直接作用。为促进作物生长、提高产量, 我国大量施用化肥, 其中, 氮肥施用量已占全球三分之一, 为世界第一消费大国[1]。由于我国大多数地区农业种植方式比较粗放, 肥料利用率低, 大部分的营养元素随着地表径流和土壤渗漏等途径迁移进入水体, 造成水体富营养化和地下水污染。如何采取措施减少土壤养分淋失、提高养分利用率是人们长期以来关注的问题。

贵州自然条件复杂, 土壤类型较多, 从亚热带的红壤到暖温带的棕壤都有分布。其中黄壤分布面积最多, 遍及贵州高原的主体部分, 占全国黄壤面积的 25.3%, 是贵州主要农业土壤类型, 在贵州农业生产中发挥着重要作用[2]。但黄壤质地粘、土壤酸度大、土壤保肥持水能力差, 生产力水平低。同时, 贵州省位于副热带东亚大陆季风区, 属中国亚热带高原季风湿润气候。降雨量丰富, 丰富的降雨量及特殊的土壤条件导致贵州省水土流失严重。根据 2002 年来全国第二次水土流失遥感调查, 贵州水土流失面积达 7.31×10^4 km², 占全省土地面积的 42.0% [3], 水土流失造成氮磷养分大量淋失, 土壤肥力下降, 不仅影响作物生长, 浪费资源, 由之而来的农业面源污染问题也越来越突出。

近年来,生物炭(biochar)用做土壤改良剂以减少养分淋失的研究日益增多。生物炭由废弃生物质热裂解产生,具有孔隙发达、比表面积大、表面负电荷多等特性[4]。施用生物炭对于改善土壤质量、保持土壤肥力及减少养分淋失有显著效果,如在旱作农田添加玉米和油菜秸秆制成的生物炭,能够抑制土壤酸化,增加有效磷的含量[5]。在灌淤土中添加稻壳制成的生物炭,能显著增加土壤全氮、速效磷和速效钾含量,显著降低土壤淋溶液中矿质态氮含量[6]。目前,生物炭对黄壤土壤养分含量和流失影响的研究较少,不够全面[7]。基于此,本研究以贵州黄壤为研究对象,采用土柱室内模拟,研究不同生物炭添加量对土壤养分及土壤淋溶液体积、总氮、总磷、硝态氮和铵态氮淋失的影响,为生物炭改良贵州黄壤、合理施用生物炭、控制农业面源污染提供理论依据。

2. 材料与方法

2.1. 试验材料

供试土壤采自贵州大学教学实验农场的表层(0~20 cm)土壤,土壤类型为黄壤,基本性质为:pH 值 5.08,全氮 1.68 g/kg,全磷 0.97 g/kg,速效磷 20.2 mg/kg,速效氮 86.8 mg/kg。研究所用生物炭采购于沈阳隆泰生物工程有限公司,以纯稻壳为原料 450℃热裂解所得,pH 值 7.86,碳含量 45.59%,全氮 7.59 g/kg,全磷 1.09 g/kg。试验所用肥料为尿素、过磷酸钙和氯化钾,其氮、磷、钾含量分别为 46%、18%、60%。

2.2. 淋溶试验装置

选取内径 10 cm,高 30 cm 的 PE 圆柱管作为淋失试验的装置,圆柱管底部用无菌纱布封紧,铺三层滤纸,再铺一层 3 cm 厚、粒径为 1~2 mm 经 2.0 mol/LH₂SO₄ 浸泡过夜、并用蒸馏水洗净的干燥石英砂,在石英砂表面铺两层滤纸,圆柱管内壁涂抹一层凡士林以减少土柱的边缘效应,最后将每个处理按照原土壤容重装入装置,土柱装好后在表层垫一层滤纸以防止水分淋溶过程中对表层土的扰动。

2.3. 试验设计

试验设置 4 个水平,每个水平设 3 个重复。其中每个土柱干土称重均为 1500 g,4 个水平的生物炭用量分别为:B0(0 kg/m²)、B2 (2 kg/m²)、B4 (4 kg/m²)、B6 (6 kg/m²),即生物炭添加量分别为 0 g、13.35 g、26.67 g、14.01 g,肥料添加均为尿素 0.4087 g,过磷酸钙 0.6833 g,氯化钾 0.0783 g(相当于施氮量 240 kg/hm²,施磷量 105 kg/hm²,施钾量 60 kg/hm²)。根据处理方案,按照比例将干土、生物炭以及肥料混合均匀,加入淋溶装置中。

土柱填装完成后,开始 5 天内,每天用蒸馏水模拟降雨 78.5 ml,折合降雨量为 10 mm,让肥料在土壤中充分反应,直到有淋溶液淋出;然后每隔 6 天模拟 1 次降水 157 ml(折合降雨量 20 mm),共 3 次;之后每隔 10 天降水 1 次 235.5 ml(折合降雨量 30 mm),共 3 次;然后再隔 10 天后降水 314 ml(折合降雨量 40 mm)。历时 63 天。试验中降雨量和强度参照贵阳市花溪区 2015 年 7 月至 8 月的平均降雨量。每次收集到的淋溶液充分混匀后,测量淋溶液体积、总氮、总磷、铵态氮和硝态氮含量。实验结束后测定每个处理的土壤中的养分含量、土壤 pH。

2.4. 测定指标、方法及数据分析

淋洗液中总氮、总磷、硝态氮和铵态氮的含量分别采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法、过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法、紫外分光光度法和纳氏试剂分光光度法测定,淋洗结束后用电位计法、凯氏定氮法、钼锑抗比色法、碱解扩散法、碳酸氢钠-钼锑抗比色法测定土壤 pH 值、全氮、全磷、速效氮、速效磷。所有试验数据利用 SPSS18.0 软件进行单因素方差分析。多重比较采用最小显著差异法(LSD),显著性水平设定为 0.05,用 office2007 作图。

3. 结果与分析

3.1. 不同生物炭添加量对土壤养分含量的影响

从表 1 可以看出, 试验结束后虽然土壤仍表现为弱酸性, 但各处理土壤的 pH 值都有增加, B2、B4 和 B6 土壤 pH 值比 B0 分别提高了 0.13、0.20、0.24 个单位, 其中 B0 与 B4 和 B6 差异显著, 与 B2 差异不显著, 土壤 pH 值随生物炭用量增加而提高, 这是由于生物炭本身含有 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} 等盐基离子, 进入土壤以后会有一定程度的释放, 交换土壤中的 H^+ 和 Al^{3+} , 从而降低其浓度, 提高盐基饱和度并调节土壤 pH 值[8]。房彬、李心清等人用生物炭对旱作农田土壤理化性质及作物产量影响的研究中, 呈弱碱性土壤的 pH 也提高了 0.1~0.2 [5]。同样, 试验后生物炭的添加均提高了土壤全氮、全磷、速效氮和速效磷的含量, 且随着生物炭添加量的增加而增加, 当生物炭施用量为 2 kg/m^2 (B2) 时, 土壤中的全氮、全磷、速效氮虽然提高了, 但与不施生物炭相比差异不显著, 而生物炭施用量为 4 kg/m^2 (B4) 和 6 kg/m^2 (B6) 比 B0 差异显著。出现这一结果除了和生物炭本身具有较高的养分有关外, 生物炭对营养元素的吸附作用也是很重要的原因。生物炭的比表面积较大, 施入土壤后可以吸附多种离子, 还可以吸附土壤有机分子, 从而提高土壤养分的吸持容量[9]。

3.2. 不同生物炭添加量对土壤淋失液体积的影响

淋溶试验每个处理进行了 7 次淋溶, 累计添加淋溶液量为 1884 ml, 如表 2 所示。B0 最终累积淋失量为 1271 ml, 占添加溶液的 67%, 每个处理的最终累积淋溶液体积由小到大依次为 $\text{B6} < \text{B4} < \text{B2} < \text{B0}$, B2, B4, B6 的累积淋溶液体积分别比 B0 处理减少了 0.3%, 1.5%, 2.0%。B2、B4 与 B0 相比差异不显著, B6 与 B0 差异显著。由此可知, 添加生物炭能增加土壤的持水性, 降低水分的淋失; 添加生物炭的量越多土壤的持水性能越好, 淋失液的量越少。这与生物炭的结构有关, 生物炭孔隙多, 且孔隙大, 能够吸附更多的水分, 把生物炭加入土壤使土壤具有更大的孔隙度, 能保持较多的水分。

Table 1. The chemical property and nutrient content of soil in different treatments

表 1. 试验后各处理土壤基本化学性质和养分含量测试结果

处理	PH	全氮g/kg	全磷g/kg	速效氮mg/kg	速效磷mg/kg
B0	5.70a	1.58a	0.74a	84.35a	21.89a
B2	5.83ab	1.62ab	0.80ab	85.87a	27.75b
B4	5.90bc	1.67bc	0.90bc	105.47b	30.07c
B6	5.94c	1.71c	1.03c	107.80b	30.57c

注: 不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平上存在显著性差异。

Table 2. Cumulative water leaching volume in different treatments

表 2. 不同处理下土柱累积淋溶液体积

处理	累积淋溶液体积(ml)						
	11d	17d	23d	33d	43d	53d	63d
B0	131.67a	262.00a	386.67a	577.00a	777.33a	982.00a	1271.33a
B2	128.00b	256.67ab	383.00a	574.67ab	770.33ab	974.33ab	1267.00ab
B4	125.00b	247.00b	371.33a	559.67bc	756.67bc	962.33ab	1251.67ab
B6	126.00b	248.33b	371.33a	557.67c	752.33c	955.33b	1245.33b

注: 不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平上存在显著性差异。

3.3. 不同生物炭添加量对总磷淋失的影响

由图 1 可以看出, 各处理淋失液中总磷浓度的变化趋势基本一致, 均是由第 1 次淋溶有较高浓度, 第 2 次淋溶浓度迅速降低, 然后基本维持在一个较低的水平上。添加生物炭的处理中只有 B2 在浓度最高值时的浓度是低于 B0, 浓度为 0.85 mg/L, B0 浓度为 0.93 mg/L, 其余处理均高于 B0, B4、B6 的浓度分别为 1.23 mg/L、1.16 mg/L。试验期间随着淋溶次数的增加, 总磷的累积量逐渐增加(如图 2)。淋溶液中累积总磷的淋溶量由大到小依次是: B4(0.24 mg) > B6(0.23 mg) > B0(0.20 mg) > B2(0.17 mg), 只有 B2 处理的总磷淋溶量显著低于 B0($P < 0.05$), 此处理下总磷的淋失量降低了 13.57%, 其余处理均显著高于 B0, 总磷淋失量在 B4 和 B6 生物炭施用量条件下分别提高了 18.92%和 12.64%, 这一结果表明, 加入生物炭能降低磷在土壤里的淋失, 少量的生物炭能减少磷素的淋失, 生物炭含量高反而会增加磷的淋失。荷兰相关研究发现, 磷饱和和土壤会引起大量磷淋溶到地下水, 其量取决于土壤磷素饱和度, 施磷量等[10]。试验在同等施磷量添加下, 可能较高的生物炭量使土壤达到了磷饱和, 所以生物炭含量高反而会增加磷的淋失。

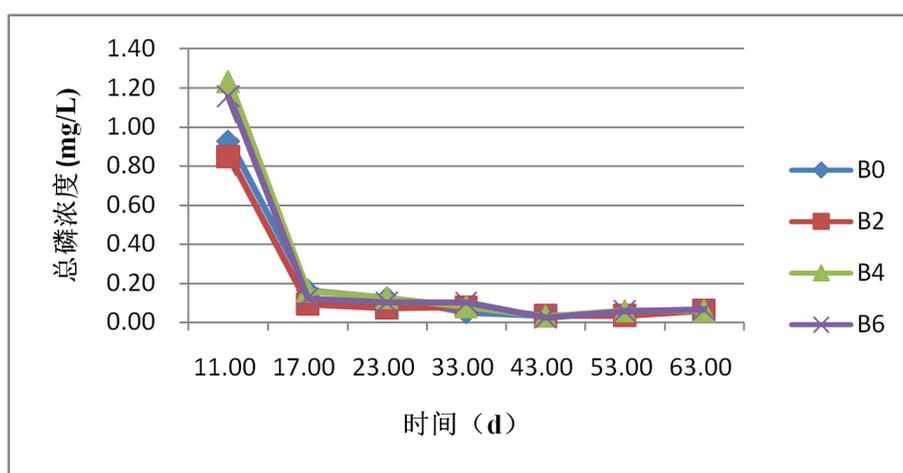


Figure 1. Concentration of total phosphorus in leachates from different treatments
图 1. 不同处理下淋溶液中的总磷浓度

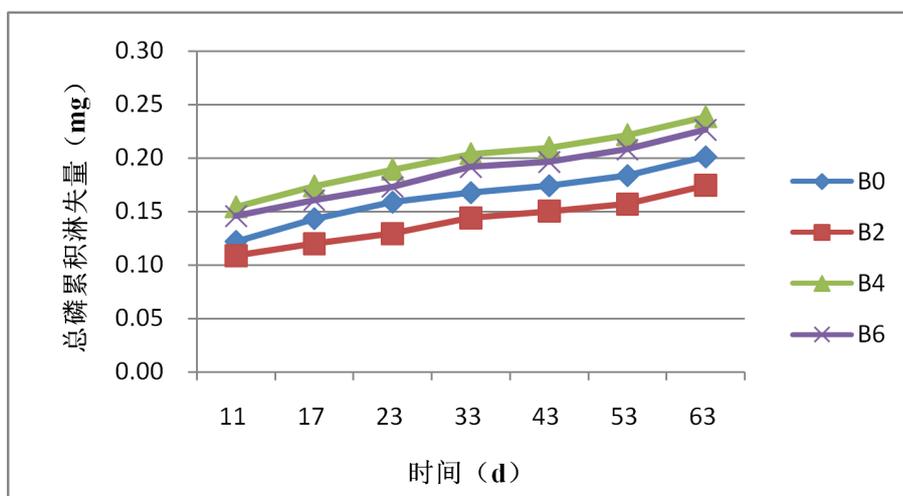


Figure 2. Amount of the cumulative total phosphorus in leachates from different treatments
图 2. 不同处理下淋溶液中累积总磷淋溶量

3.4. 不同生物炭添加量对土壤淋失液中的 NH_4^+ -N 的影响

图 3 表明, 各处理 NH_4^+ -N 的浓度均呈现先降低后稍稍升高, 最后以不同的速率降至一个低浓度的水平。在整个淋溶过程中, B0 的浓度始终显著高于其他处理 ($p < 0.05$), 且在添加有生物炭的处理中, NH_4^+ -N 浓度随着生物炭添加比例的升高而升高。同样(图 4), 土柱中 NH_4^+ -N 累积淋溶量由小到大依次为 $\text{B2} < \text{B4} < \text{B6} < \text{B0}$, B2 的累积 NH_4^+ -N 淋失量最低。与 B0 相比, 各生物炭处理 NH_4^+ -N 的累积淋失量分别降低了 29.79%、25.29%、14.31%。由此可知, 加入生物炭能显著降低土壤中 NH_4^+ -N 的淋失, 但添加越多反而效果越小, 这可能是因为土柱中添加生物炭增加了土壤孔隙度, 提高了土壤的通氧量, 为氨化细菌创造了有利的生存条件[11]; 生物炭添加量多的水平, 氨化细菌数量可能较多, 会导致土壤生成更多的 NH_4^+ 增加淋溶量。

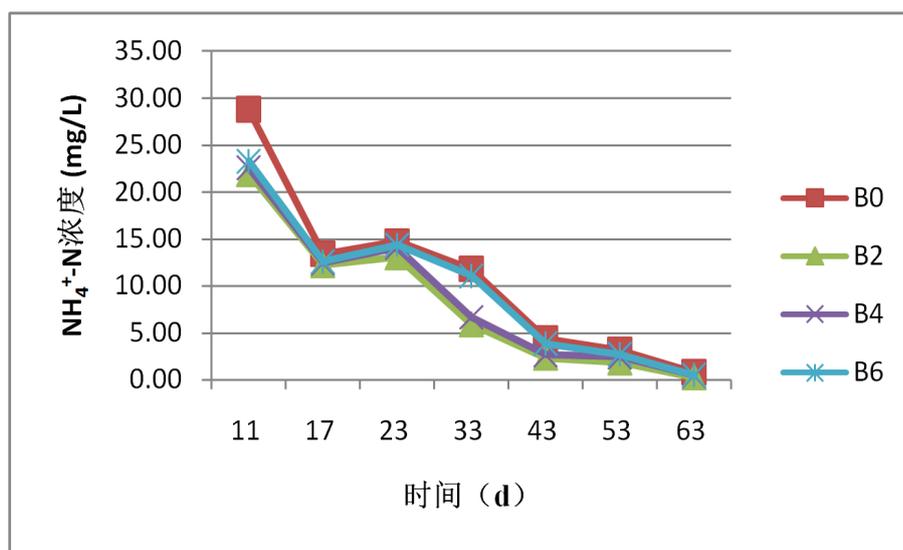


Figure 3. Concentration of ammonium nitrogen in leachates from different treatments

图 3. 不同处理下淋溶液中 NH_4^+ -N 的浓度

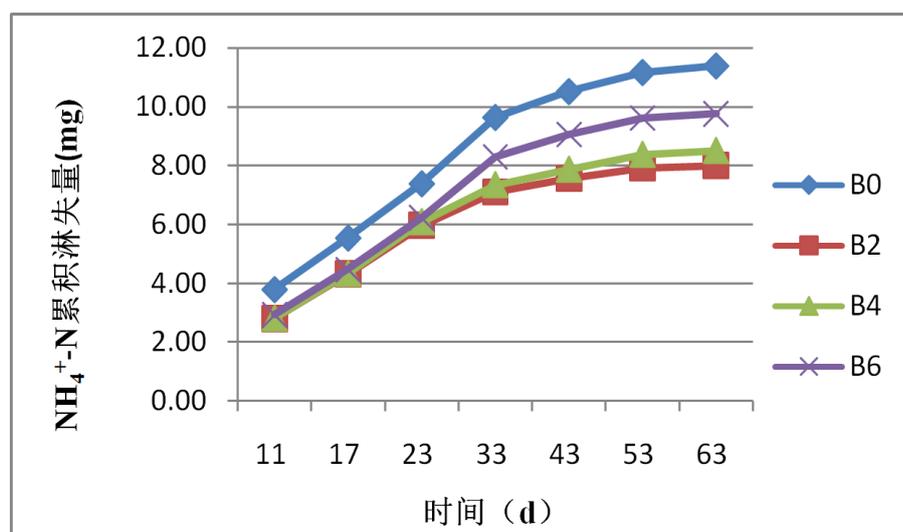


Figure 4. Amount of the cumulative ammonium nitrogen in leachates from different treatments

图 4. 不同处理下淋溶液中累积 NH_4^+ -N 淋溶量

3.5. 不同生物炭添加量对土壤 NO_3^- -N 淋失的影响

如图 5 所示, 在整个淋洗过程中, 各处理的 NO_3^- -N 浓度均是先增加至第 1 个峰值(第 17 天)后逐渐降低, 在第 23 天达到一个低谷后又逐渐增加至第 2 个峰值(第 33 天), 随后一直呈降低趋势。整个淋溶过程中, 开始淋溶液中 NO_3^- -N 浓度随着土柱中生物炭比例的增加而增加, 且均低于 B0, 第 63 天时 B4、B6 浓度开始高于 B0, 而 B2 始终低于 B0。从图 6 可以看出同等施肥条件下, 所有添加生物炭的处理 NO_3^- -N 淋溶量均显著低于未添加生物炭的 B0, 由小到大依次为 $\text{B2} < \text{B4} < \text{B6} < \text{B0}$, B2 的累积 NO_3^- -N 淋失量最低。与 B0 相比, 各生物炭处理 NO_3^- -N 的累积淋失量分别降低了 13.9%、5.4%、2.9%。 NO_3^- -N 浓度出现第二个峰值可能是第 23 天到 33 天相隔的天数与之前的相比天数增加, 使更多的铵态氮在硝化细菌作用下发生氧化反应生成硝态氮, 由此增加了 NO_3^- -N 浓度。除 B0 外, 累积淋溶量的大小随生物炭添加量的增多而增大, 可能是由于在土壤中添加了生物炭增加了土壤孔隙度, 提高了土壤的通氧量, 增强了硝化作用反应速率[12], 增加了淋溶液中 NO_3^- -N 的量。

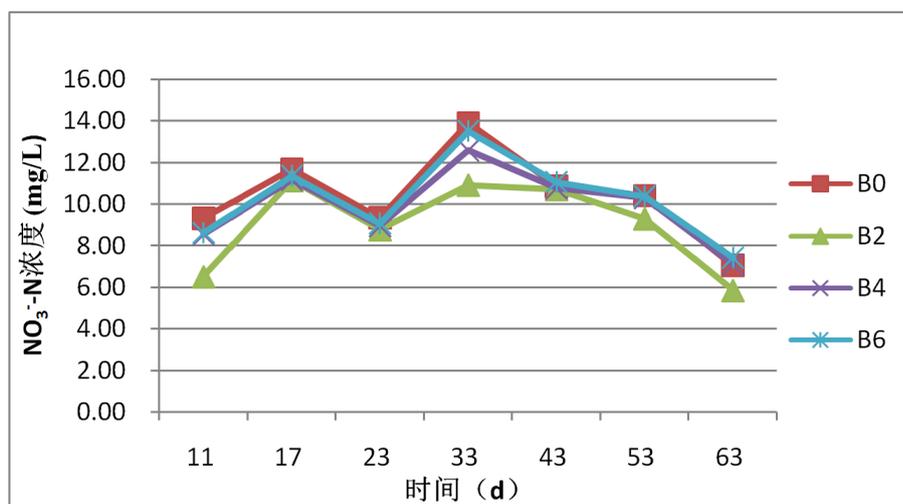


Figure 5. Concentration of nitrate nitrogen in leachates from different treatments

图 5. 不同处理下淋溶液中 NO_3^- -N 的浓度

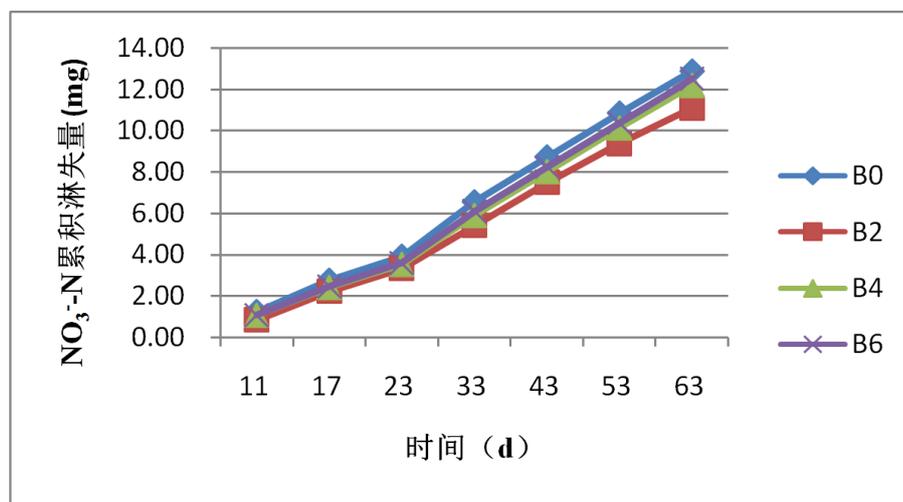


Figure 6. Amount of the cumulative nitrate nitrogen in leachates from different treatments

图 6. 不同处理淋溶液中累积 NO_3^- -N 淋溶量

3.6. 不同生物炭添加量对土壤总氮淋失的影响

由图 7 可知, 开始时各处理淋失液中总氮的浓度均从较高浓度迅速降低, 之后, B0 和 B6 的浓度有一点回升, 而 B2、B4 则保持连续降低; 43 天后, B0 的浓度又有一个小小的回升, 其他处理还是保持降低的状态, 只是降低的速率减缓。整个淋溶前期各处理间的浓度由小到大为: B2 < B4 < B0 < B6, 中后期则为 B2 < B4 < B6 < B0, 在所有处理的淋溶过程中, B2 的浓度最低。同样, 在同等施肥条件下, 总氮淋溶的趋势与铵态氮和硝态氮一致, 均由小到大依次为 B2 < B4 < B6 < B0; 所有处理的累积总氮淋失量均显著低于 B0, 其中 B2 的累积淋失量最低, 为 23.31 mg。(图 8)这可能是由于添加少量的生物炭有利于土壤中氮的固定, 减少了氮素的流失, 而高含量生物炭添加到土壤中, 增大土壤的孔隙度, 则导致有机氮更容易矿化为无机氮, 增加土壤中无机氮淋溶。这一结果与邢英等人在贵阳市乌当区采集的黄壤研究生物炭对氮淋溶的结果一致[7]。

4. 结论

生物炭能增加土壤养分, 随着生物炭添加量的增加, 淋失试验后的土壤的 pH 值、全氮、全磷、速

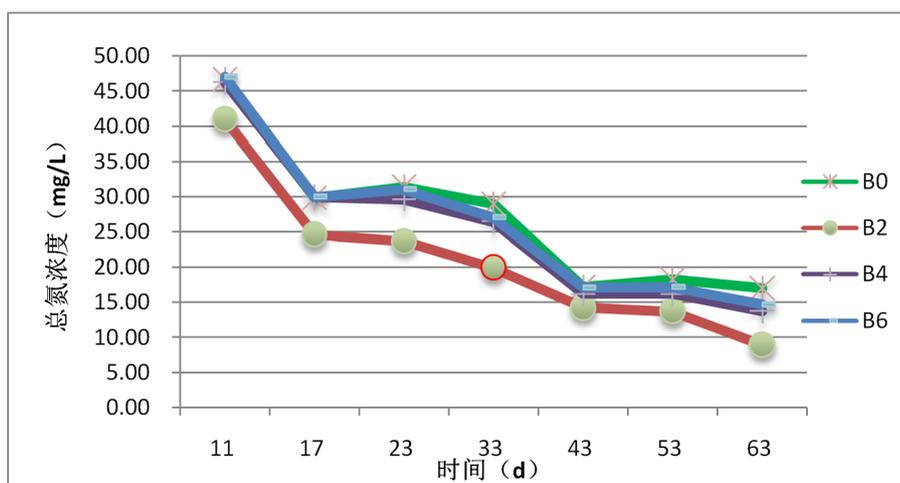


Figure 7. Concentration of total nitrogen in leachates from different treatments

图 7. 不同处理淋溶液中总氮的浓度

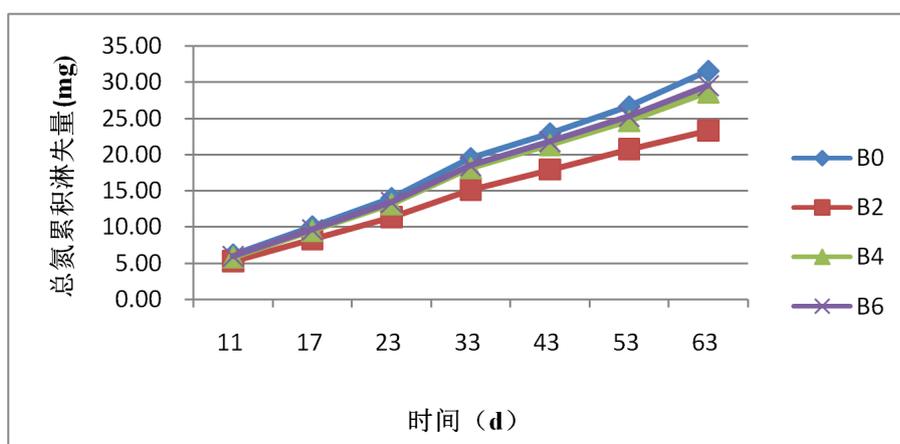


Figure 8. Amount of the cumulative total nitrogen in leachates from different treatments

图 8. 不同处理淋溶液中累积总氮淋溶

效氮和速效磷的含量逐渐增大, 其中, 以本试验最高添加量 B6 为最大。生物炭能提高土壤的持水能力, 减少土壤水分的淋失, 随着生物炭添加量的增加, 淋溶液体积逐渐减少, 但减少的百分比较小。

施用生物炭能够有效减少黄壤氮和磷的淋溶损失。当生物炭施用量为 2 kg/m^2 (B2) 时, 总磷、总氮、 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的累计淋失量低于其他处理, 这可能是由于添加少量比例的生物炭能够有利于土壤中氮、磷的固定, 减少了氮素与磷素的流失, 而高含量生物炭添加到土壤中, 能够改善土壤的物理性质, 却增大土壤颗粒的孔隙度, 通透性增强, 土层疏松, 反而促进了养分的淋溶。因此, 确定一个合理的生物炭施用量是重要的; 具体地, 2 kg/m^2 是对黄壤氮和磷淋失有显著控制作用的施用量。

添加生物炭能改善黄壤营养状况, 提高养分利用效率, 降低环境风险, 同时生物炭施用并不是越多越好, 这一结果存在一个最合适的生物炭施用量规律。由于不同来源生物炭以及不同炭化条件对于生物炭的性质影响很大, 进而可能影响其环境效益, 一种来源的生物炭对氮磷淋失的效应可能很难得出全面的结论, 为了深入了解生物炭对土壤氮磷淋失的影响机制和实际应用方法, 需要进一步进行不同生物炭施用的控制试验。

基金项目

中央高校基本科研业务费专项基金(310829173601)。

参考文献 (References)

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 2009 年中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010.
- [2] 李渝, 张雅蓉, 张文安, 等. 贵州黄壤地区不同施肥处理及降雨量对玉米产量的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(1): 230-235.
- [3] 秦松, 范成五, 孙锐锋. 贵州土壤资源的特点、问题及利用对策[J]. 贵州农业科学, 2009, 37(5): 94-98.
- [4] Xu, G., Lv, Y., Sun, J., *et al.* (2012) Recent Advances in Biochar Applications in Agricultural Soils: Benefits and Environmental Implications. *Clean-Soil, Air, Water*, **40**, 1093-1098. <https://doi.org/10.1002/clen.201100738>
- [5] 房彬, 李心清, 赵斌, 钟磊. 生物炭对旱作农田土壤理化性质及作物产量的影响[J]. 生态环境报, 2014, 23(8): 1292-1297.
- [6] 惠锦卓, 张爱平, 刘汝亮, 等. 添加生物炭对灌淤土土壤养分含量和氮素淋失的影响[J]. 中国农业气象, 2014, 35(2): 156-161.
- [7] 邢英, 李心清, 王兵, 等. 生物炭对黄壤中氮淋溶影响: 室内土柱模拟[J]. 生态学杂志, 2011, 30(11): 2483-2488.
- [8] Van Zwieten, L., Kimber, S., Morris, S., *et al.* (2010) Effects of Biochar from Slow Pyrolysis of Papermill Waste on Agronomic Performance and Soil Fertility. *Plant and Soil*, **327**, 235-246. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0050-x>
- [9] Lehmann, J., Gaunt, J. and Rondon, M. (2006) Biochar Sequestration in Terrestrial Ecosystems: A Review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, **11**, 403-427. <https://doi.org/10.1007/s11027-005-9006-5>
- [10] Vander Melen, D.T., Breeuwsma, A. and Bcers, P.C.M. (1998) Agricultural Nutrient Losses to Surface Water in the Netherlands: Impact, Strategies, and Perspective. *Journal of Environmental Quality*, **27**, 4-11. <https://doi.org/10.2134/jeq1998.00472425002700010002x>
- [11] Ruser, R., Flessa, H., Russow, R., *et al.* (2006) Emission of N_2O , N_2 and CO_2 from Soil Fertilized with Nitrate: Effect of Compaction, Soil Moisture and Rewetting. *Soil Biology & Biochemistry*, **38**, 263-274. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.05.005>
- [12] Luo, Y.M., Qiao, X.L., Song, J., *et al.* (2003) Use of a Multi-Layer Column Device for Study on Leachability of Nitrate in Sludge-Amended Soils. *Chemosphere*, **52**, 1483-1488. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00486-7](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00486-7)

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2164-5485，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：aep@hanspub.org